

# Desalinización de agua marina en España: Aspectos a considerar en el diseño del sistema de vertido para protección del medio marino

Desalinisation of seawater in Spain: Aspects to be considered in the design  
of the drainage system to protect the marine environment

**Pilar Palomar Herrero.** Ingeniera Técnica de Obras Públicas, Licenciada en Ciencias Ambientales.  
Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente,  
Grupo de Ingeniería Oceanográfica y Costera, Universidad de Cantabria. ppalomar@mma.es

**Íñigo Losada Rodríguez.** Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Catedrático de Universidad. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y Costera. Universidad de Cantabria.  
Instituto de Hidráulica Ambiental. inigo.losada@unican.es

**Resumen:** La puesta en marcha del vigente Plan Hidrológico Nacional implica un aumento significativo de la desalinización de agua marina como fuente de recurso hídrico en las cuencas costeras españolas, y con ello, del caudal de salmuera generado y vertido al Mar Mediterráneo, con riesgo de afección negativa sobre sus hábitats.

El presente artículo ofrece a técnicos y gestores una visión completa y un análisis sobre los principales aspectos a considerar en los estudios de vertido al mar de la salmuera: efectos y umbrales críticos de salinidad para ecosistemas del Mar Mediterráneo, sistemas de descarga, comportamiento del efluente en el medio receptor, formulaciones matemáticas, herramientas y software de modelización disponibles y planes de vigilancia. Se concluye con una serie de recomendaciones de utilidad para el diseño de estos sistemas de vertido.

**Palabras Clave:** Desalación; Vertido; Salmuera; Impacto; Fanerógama

**Abstract:** The introduction of the new National Water Plan has implied a significant increase in the desalinisation of seawater as a source of water supply to the Spanish coastal basins. This has, in turn, generated a flow of brine that is discharged into the Mediterranean with potentially negative effects for the marine environment.

The present article offers technicians and administrators a complete view and analysis of the main aspects to be considered in studies on the drainage of brine into the sea: the effects and critical thresholds of salinity for the ecosystems of the Mediterranean; drainage systems; behaviour of the effluent in the receiving medium; mathematical formulae, available modelling tools and software; and monitoring plans.

The article concludes with a series of recommendations for the design of these drainage systems.

**Keywords:** Desalinisation; Drainage; Brine; Impact; Phanerogam

## 1. La desalinización. El Plan Hidrológico Nacional

La desalinización es un proceso de separación artificial de las sales en un fluido salobre con el fin de obtener agua dulce apta para consumo. Para la desalinización de agua marina, en España se emplea principalmente la técnica de osmosis inversa (RO), donde el agua bruta se hace pasar a través de unas membranas

semipermeables (generalmente arrolladas en espiral), y mediante la aplicación de altas presiones (50-80atm) se invierte el proceso químico natural de osmosis y se produce el flujo de agua dulce a través de las mismas, quedando retenida la sal en forma de solución hipersalina. Para las tasas de rendimiento comunes (45-50%), se obtiene aproximadamente una mitad de volumen de agua dulce producto, y otra de fluido hipersalino o sal-

muera. La primera se impulsa hacia un depósito de regulación o a la red de distribución, mientras que la salmuera generalmente es vertida al mar.

La aprobación del vigente Plan Hidrológico Nacional (Real Decreto Legislativo 2/2004, y posterior Ley 11/2005, de 22 de junio) deroga al anterior plan de trasvase de agua entre cuencas y apuesta por fuentes hídricas no convencionales, principalmente la desalinización. El plan se está desarrollando a través del programa A.G.U.A. ("Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua", 2004-08), que incluye entre sus actuaciones urgentes y prioritarias, la construcción y puesta en marcha de veintisiete plantas desalinizadoras en las Cuencas Mediterráneas, principalmente promovidas por la sociedad estatal ACUAMED.S.A. La producción objetivo del plan es de unos 1,55 Mm<sup>3</sup>/día (550 Hm<sup>3</sup>/año) de agua desalinizada, de los que el 83% procederá de agua marina (Baltanás, 2005).

En grandes cifras, la desalinización en España ha pasado de unos 1.2 Mm<sup>3</sup>/día (0.7 de agua marina) y 750 plantas en el año 2000, a unos 1.5 Mm<sup>3</sup>/día y unas 900 plantas en el año 2005 y a previsiones de unos 2.8 Mm<sup>3</sup>/día (980Hm<sup>3</sup>/año) para el año 2010 (Torres, 2005). En lo que al presente artículo interesa, este hecho implica un aumento muy significativo del caudal de salmuera vertido al mar. El vertido de este efluente hipersalino al Mar Mediterráneo (de escasa renovación de aguas y condiciones estables) implica un riesgo significativo de afección y pérdida de hábitats y ecosistemas endémicos y de alto valor ecológico (Gacia y Ballesteros, 2001).

La Tabla 1 muestra la situación de los proyectos de plantas desalinizadoras incluidos en el programa A.G.U.A. a fecha de enero de 2008 (ACUAMED.S.A.), señalando aquellos que cuentan con Declaración de Impacto Ambiental (DIA).

## 2. La salmuera: composición y propiedades

La principal característica de la salmuera es su exceso de salinidad con respecto al agua natural de mar (casi el doble en los procesos de osmosis inversa: RO) y, consecuentemente, su mayor densidad. En el caso particular del Mar Mediterráneo, donde al agua marina presenta salinidad y densidad media de 37.5 psu y 1027Kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, la salmuera resultante tendrá una salinidad y densidad aproximadas de 68 psu y 1051 Kg/m<sup>3</sup>.

Tabla 1. Desalinizadoras del programa A.G.U.A.

| GIRONA          |       |                                 | ALMERÍA                                      |                             |                                    |
|-----------------|-------|---------------------------------|--|-----------------------------|------------------------------------|
| ❖               | 10    | Ampliación planta Tordera---DIA | ✓  | 42                          | Carboneras I                       |
| BARCELONA       |       |                                 |  | 20                          | Níjar                              |
| □               | 60    | Planta de Barcelona --- DIA     |  | 20                          | Bajo Almanzora --- DIA             |
| BALEARES        |       |                                 | □  | 30                          | Campo de Dalías --- DIA            |
| □               | 17    | 4 plantas                       | ✕  | 5                           | Adra                               |
| CASTELLON       |       |                                 | MÁLAGA                                       |                             |                                    |
| □               | 18    | Oropesa --- DIA                 | ✓  | 20                          | Marbella                           |
|                 | 15    | Moncófar --- DIA                |  | 60                          | El Atabal                          |
| VALENCIA        |       |                                 | □  | 20                          | Costa del Sol Occidental           |
| □               | 8     | Sagunto --- DIA                 | CANARIAS                                     |                             |                                    |
| MURCIA-ALICANTE |       |                                 | □  | 9                           | Canarias                           |
| ✓               | 24    | San Pedro del Pinatar I         | □  | 10                          | Canarias                           |
|                 | 6     | Ampliación de Alicante I        | CEUTA  |                             |                                    |
|                 | 24    | San Pedro del Pinatar II        | ✓  | 7.5                         | Ceuta                              |
|                 | 50    | Valdelentisco                   | MELILLA                                      |                             |                                    |
| □               | 24    | Alicante II                     | ✓  | 7.5                         | Melilla                            |
|                 | 40-60 | Aguilas-Guadalentín --- DIA     | <b>LEYENDA</b>                               |                             |                                    |
|                 | 5     | Ampliación de Aguilas --- DIA   |  |                             |                                    |
|                 | 80    | Trasvase Tajo-Segura---DIA      | Caudal de producción en Hm <sup>3</sup> /año |                             |                                    |
| □               | 4     | Ampliación del Mojón --- DIA    | ✓  | Puestas en servicio 2005-06 | En licitación o próxima licitación |
|                 | 9     | Marina Alta o Denia --- DIA     | □  | En construcción             | ✕ En información pública           |
|                 | 18    | Marina Baja, Campello --- DIA   | □  | Adjudicadas                 | ✖ En redacción                     |
| ❖               | 20    | Vega Baja del Segura-l'Alacantí |  |                             |                                    |
|                 | 10    | Jávea                           |  |                             |                                    |

En relación con su composición química, la salmuera no se considera un contaminante, dado que, en principio, sus componentes son los mismos que los del agua de mar pero en mayor concentración. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el agua bruta se somete a un pretratamiento de filtrado y empleo de aditivos químicos para una depuración previa a su paso por las membranas de osmosis. Entre los aditivos químicos más empleados en las plantas de osmosis inversa, destacan (Gacia y Ballesteros, 2001; Cerezo, 2006): hipoclorito sódico comercial (para la eliminación contaminación bacteriológica); bisulfito o metasulfito sódico (para la eliminación de oxidantes); derivados de polifosfatos (hexametáfosfato sódico) o poliácridatos (anti-incrustantes para evitar la precipitación de sales en la membrana); ácido sulfúrico (reducción de pH); y cloruro férrico (como coagulante). Estos aditivos se encuentran a nivel de trazas y en la práctica son ignorados. En ocasiones deberían tenerse en cuenta no tanto por su concentración como por su efecto persistente en el medio (Gacia y Ballesteros, 2001).

Con cierta frecuencia se realizan en planta operaciones extraordinarias de limpieza de membranas y filtros, que generan un efluente de rechazo, aparte de la salmuera, con altas concentraciones de sólidos en suspensión, anti-incrustantes y detergentes (Gacia y Ballesteros, 2001; Mauguin et al, 2005). En las desalinizadoras

españolas actuales, este efluente se somete a un tratamiento de depuración independiente o se vierte escalonadamente y diluido en la salmuera, por lo que no implica una contaminación adicional significativa.

Por su propia naturaleza, la salmuera no presenta contaminación biológica.

### 3. Efectos de la salmuera sobre los ecosistemas del medio marino. Límites críticos de salinidad

El vertido al mar del efluente salmuera, debido a su hipersalinidad (e incluso concentración de sustancias químicas), puede provocar efectos negativos sobre el medio marino, especialmente sobre los organismos bentónicos (ligados al sustrato) de carácter estenohalino (intolerantes a variaciones bruscas de salinidad).

En la actualidad existe un vacío legal respecto a las limitaciones en el vertido al mar de la salmuera, tanto en los valores de emisión como en las concentraciones permitidas en el medio receptor. La Directiva relativa al vertido de sustancias peligrosas al medio acuático (2006/11/CE) no incluye los componentes químicos característicos de la salmuera ni de las aguas extraordinarias de limpieza. La Directiva de objetivos de calidad en la depuración de aguas residuales urbanas (91/271/CE y 98/15/CE) establece el control en medio receptor sobre algunos parámetros potencialmente significativos en los vertidos de desalinizadoras (DBO<sub>5</sub>, sólidos en suspensión, etc.) pero, en general, con valores por encima de los previsibles para el caso de la salmuera. Otras Directivas, como la de Calidad de Aguas de Baño (2007/6/CE), establecen el control sobre parámetros biológicos propios de las aguas residuales urbanas, y no representativos de la salmuera. La Directiva de calidad de las aguas para la cría de moluscos (2006/113/CE) limita algunos parámetros de interés en nuestro caso: pH, sólidos en suspensión, oxígeno disuelto, etc., e incluso salinidad, pero los límites marcados se basan en los efectos sobre moluscos, no identificables a las fanerógamas marinas y otras especies susceptibles de afección. La Directiva Marco de Agua (2000/60/CE) recoge también la concentración salina como indicador físico químico de calidad, pero sin fijar valores límite. Por tanto, no se cuenta en la actualidad con legislación vigente donde se indiquen límites críticos para los componentes químicos y propiedades físicas

propias de la salmuera, y que se hayan establecido en función de los hábitats y especies presentes y susceptibles de ser afectados.

En este marco, se han realizado numerosos estudios e investigaciones científicas para detectar el efecto de estos vertidos sobre el medio marino. Entre otros, destacan los siguientes:

- **Anoxia en los fondos marinos:** La salmuera vertida al mar se hunde hacia el fondo debido a su mayor densidad. La columna de agua queda dividida en un fluido bicapa, donde el agua marina, de menor densidad, constituye la capa superior y la salmuera, la inferior. La pycnoclina que separa ambos fluidos dificulta su mezclado. En condiciones de calma en el medio receptor, con escasa renovación de las aguas, la presencia de especies bentónicas consumidoras de oxígeno puede llevar a episodios de anoxia en el fondo (Gacía y Ballesteros, 2001).
- **Modificación de las condiciones de luz:** La presencia de un fluido hipersalino modifica el coeficiente de reflexión de la luz filtrada, provocando la formación de una neblina que dificulta el paso de luz, afectando a la fotosíntesis de las especies marinas vegetales (Einav y Lokiec, 2003). Este efecto se acentúa con la turbulencia provocada por el vertido, principalmente si es de tipo chorro.
- **Afección a especies marinas:** Se han detectado reducciones significativas en las comunidades de equinodermos (empleados como bioindicadores por su sensibilidad) cerca de la zona del vertido. Por ejemplo, efectos negativos sobre las especies: erizo *Paracentrotus Lividus* y el misidáceo *Leptomyxis posidoniae* (Lloret et al, 2001).
- **Afección a fanerógamas marinas:** Los estudios realizados en el Mar Mediterráneo revelan efectos negativos sobre las fanerógamas marinas ante la presencia de efluente salmuera. En particular, para la *Posidonia oceanica* (hábitat de interés comunitario prioritario, por la Directiva 92/43/CEE), se ha detectado un aumento de la mortandad en los individuos, aparición de necrosis en los tejidos y mayor caída de las hojas (Autores varios, 2003). Respecto a la *Cymodocea nodosa*, degradación y desaparición de sebadales en Canarias (Pérez Talavera y Ruiz Quesada, 2001); y efectos también negativos sobre el alga *Caulerpa prolifera* (Terrados, 1991).

| Tabla 2. Límites de tolerancia estimados para distintas especies del Mar Mediterráneo. Salinidad en "psu", unidades prácticas de salinidad |   |        |
|--|---|--------|
| Ecosistema   | Límite salinidad  | Fuente |
| <i>Posidonia oceanica</i>  | No superar 38.5psu en más del 25% de las observaciones.<br>No superar 40psu en más del 5% de las observaciones  | 1      |
| <i>Cymodocea nodosa</i>  | No superar 39.5psu en más del 25% de las observaciones.<br>No superar 41psu en más del 5% de las observaciones. | 2      |
| <i>Caulerpa prolifera</i>  | Límite establecido en el rango aproximado de 50-60 psu.   | 3      |
| <i>Bivalvos</i>  | Límite establecido en el rango aproximado de 50-70psu   | 4      |
| <i>Paracentrotus Lividus</i><br><i>Leptomyxis posidoniae</i>   | Límite establecido en un valor aproximado de 41g/l  | 5      |
| <i>Zostera noltii</i>  | Límite establecido en aproximadamente 41psu   | 6      |

(1) Autores Varios, 2003. En base a experimentos y medidas en laboratorio y campañas de campo. (2) Ministerio de Medio Ambiente, 2006. Valor recomendado por el CEDEX, justificado por la presencia de esta fanerógama en el Mar Menor (Murcia), donde las salinidades están en el rango 43-47psu. (3) Terrados, 1991. (4) Iso et al, 1994. (5) Lloret et al, 2001. (6) Fernández y Sánchez Lisazo, 2006.

La tabla 2, de elaboración propia a partir de la bibliografía recopilada, indica los límites críticos de salinidad estimados para la supervivencia de algunas especies de interés en el Mar Mediterráneo.

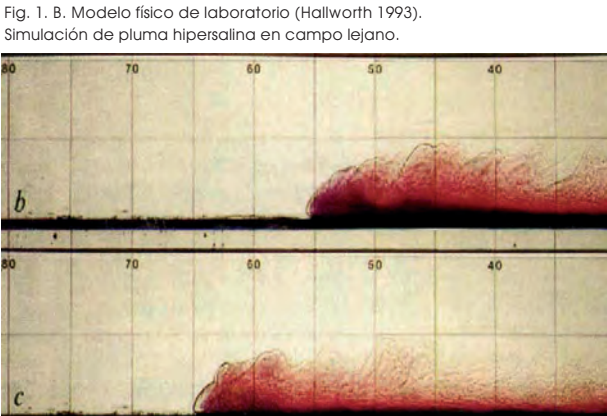
4. Comportamiento de la salmuera en el medio receptor marino: campo cercano y lejano

En la caracterización del comportamiento del efluente salmuera en el medio marino receptor, se distinguen dos regiones: campo cercano y lejano, que se diferencian en el flujo del efluente salmuera, en las fuerzas dominantes, en las escalas espacial y temporal del fenómeno y en la influencia de las condiciones del medio receptor, entre otros.

La región de *campo cercano*, Fig. 1. A, se localiza en los alrededores del punto de vertido. Se trata de la zona inicial de mezcla, donde el comportamiento del efluente salmuera depende principalmente del sistema de vertido empleado y de las características físicas del

efluente respecto al fluido receptor. El diseño del sistema de descarga se enfoca a maximizar la mezcla y dilución de la salmuera en el agua de mar, que en esta zona se produce por las turbulencias asociadas al movimiento relativo de los efluentes y que depende la densidad relativa entre ambos. La variación de los parámetros geométricos y de dilución en el efluente salmuera responde a escalas espaciales de metros y temporales, de minutos, dominando los procesos físicos frente a los químicos (que se desprecian). En el caso de vertido en chorro a gran velocidad, normalmente el comportamiento en esta región se considera independiente de las condiciones del medio receptor (batimetría, estratificación, corrientes, etc.).

A cierta distancia del punto de descarga se produce el colapso del movimiento y turbulencia asociada al vertido, la salmuera se hunde por su mayor densidad y se forma un pluma hipersalina que avanza como corriente densa sobre el lecho marino. Es la región de *campo lejano*, Fig. 1. B. En esta zona la columna de agua se presentará como un fluido bicapa, donde el





agua marina ocupa la capa superior y la salmuera, la inferior. La interfaz o pycnoclina que separa ambos fluidos dificulta su mezclado. El comportamiento de la pluma depende de las condiciones ambientales en el medio receptor (batimetría, rugosidad del fondo, corrientes, oleaje, etc.) y de la diferencia de densidad entre fluidos. La variación de los parámetros geométricos y de dilución responde a escalas espaciales del orden de kilómetros y temporales, de horas, de modo que la pluma hipersalina de salmuera puede desplazarse grandes distancias sin apenas dilución, afectando incluso a especies alejadas de la zona de vertido.

### 5. Influencia de los métodos de vertido en el comportamiento de la salmuera en la región de campo cercano

El sistema de vertido al mar es determinante en el comportamiento del efluente salmuera en campo cercano y en su mezcla y dilución con el agua marina. Entre los sistemas más empleados encontramos el vertido directo superficial, sobre estructuras porosas, con emisario submarino de chorro único o de tramo difusor con múltiples boquillas, así como el vertido conjunto con aguas residuales urbanas o con aguas de refrigeración de centrales térmicas.

La conveniencia de emplear un sistema u otro dependerá de diversos factores, tales como: localización del vertido, hidrodinámica del medio receptor, bioceñosis del fondo, presencia de especies estenohalinas, etc.

El vertido directo superficial supone la descarga al mar de la salmuera desde superficie y sin impulso inicial. En este caso, la región de campo cercano se reduce a una pequeña zona alrededor del punto de vertido, ya que la salmuera se hunde rápidamente hacia el fondo formando la pluma hipersalina característica del campo lejano. Este sistema presenta ventajas económicas y constructivas. Desde un punto de vista medioambiental, el impacto en la fase de obras es mucho menor, ya que no requiere excavaciones ni colocación de estructuras sobre el lecho marino. Su principal desventaja es la escasa dilución del efluente en campo cercano, del orden de 4 según los ensayos realizados en el laboratorio del CEPYC para medio receptor en reposo (Ruiz Mateo, 2007). Cuando la dilución en campo cercano es pequeña, la pluma hipersalina característica de campo lejano presentará salinidades muy altas, con una pycno-

clina de alto gradiente salino y densimétrico que dificultará el mezclado entre capas. De este modo, la pluma hipersalina puede propagarse grandes distancias sin apenas dilución, con riesgo de afección a los organismos bentónicos situados incluso alejados del punto de vertido. Campañas de campo de seguimiento de la pluma hipersalina han revelado su presencia a distancias superiores a 3.500 m de la zona de descarga (Fernández-Torquemada et al, 2005).

La escasa dilución en campo cercano y la dependencia de las condiciones del medio receptor, unidos a la falta de herramientas fiables para la modelización, hacen que este tipo de vertido sea inadecuado en el caso de que existan especies bentónicas estenohalinas y con valor ecológico relativamente cercanas a la zona de vertido.

El vertido en chorro de la salmuera a través de un emisario submarino es un método eficaz para maximizar la dilución en campo cercano. Si la descarga se realiza desde el fondo con cierta inclinación vertical, el efluente salmuera, de mayor densidad, describirá un movimiento parabólico. En su tramo ascendente, este movimiento está forzado por la cantidad de movimiento transmitida en la impulsión. Alcanzado el punto de máxima altura, se da paso al movimiento descendente, donde domina la fuerza gravitacional y la diferencia de densidad con el fluido receptor. Tras el impacto del chorro con el fondo, se forma una capa turbulenta que conlleva a una mezcla y dilución adicional de la salmuera. A cierta distancia del punto de vertido, se produce el colapso de la turbulencia, la salmuera se hunde por su exceso de densidad y se forma la corriente de gravedad propia del campo lejano.

Desde un punto de vista técnico y económico, este sistema de vertido en chorro es más costoso. Medioambientalmente, el impacto sobre el medio marino es mayor durante la fase de obras (excavación de los fondos, colocación de tubería, etc.). Sin embargo, en fase de explotación se reduce el riesgo de afección por presencia de la salmuera, ya que ésta se diluye rápidamente alrededor del punto de vertido. Otra ventaja es la posibilidad de controlar y maximizar la dilución mediante la optimización de los parámetros de diseño del chorro, con independencia de las condiciones en el medio receptor. Además, existen herramientas comerciales avaladas por la comunidad científica y administraciones ambientales para la modelización de este sistema, tales como el software co-



mercial CORMIX-GI (*The Cornell mixing zone expert system*).

En este tipo de descarga se emplea el chorro único o el tramo difusor de múltiples boquillas. Con éste último se obtienen mejores diluciones, gracias a una mayor superficie de contacto de la salmuera con el fluido del medio receptor y a la facilidad de conseguir altas velocidades de salida del chorro (modificando diámetros de boquilla, caudal, etc.). Ensayos realizados en laboratorio indican, para vertido con tramo difusor, diluciones en torno a 24-30 en campo cercano, según el diseño de las bocas de descarga (*Ruiz Mateo, 2007*).

Otro sistema interesante es el vertido de la salmuera sobre estructuras porosas, tales como los diques de escolleras en puertos. Existe poca bibliografía y experiencia al respecto. Los ensayos realizados en el laboratorio del CEPYC parecen indicar que se trata un sistema poco eficaz en cuanto a dilución conseguida en campo cercano, con valores del orden de 6 en situaciones de calma en el medio receptor (*Ruiz Mateo, 2007*). Otras técnicas como el vertido en zona de rompientes, desde acantilados, deberían ser también objeto de estudio. Por último, el vertido conjunto de la salmuera con aguas de refrigeración de centrales térmicas o con aguas residuales urbanas depuradas presenta importantes ventajas y se viene utilizando en algunos casos en nuestro país, tales como la desaladora de Carboneras (Almería) y la de Sagunto (Valencia), para el primer caso, y la desaladora de Barcelona, en el segundo caso.

## 6. Fórmulas físicas para modelización del fenómeno

En la modelización del vertido y movimiento de un efluente y el transporte de la sustancia que contiene (o propiedad) a través de un medio continuo acuoso se utilizan las ecuaciones físicas de la hidrodinámica: Estado, Continuidad (conservación de la masa del fluido), Conservación de la cantidad de movimiento y la Ecuación de Transporte (conservación de la sustancia).

En la actualidad, la representación de este tipo de vertidos por modelos lagrangianos se encuentra en fase de desarrollo, por lo que nos centraremos en los modelos de ecuaciones eulerianas. En este sentido, y según las hipótesis simplificativas asumidas, se distinguen tres tipos de formulaciones: modelos de longitud-escala, modelos de integración y modelos hidrodinámicos.

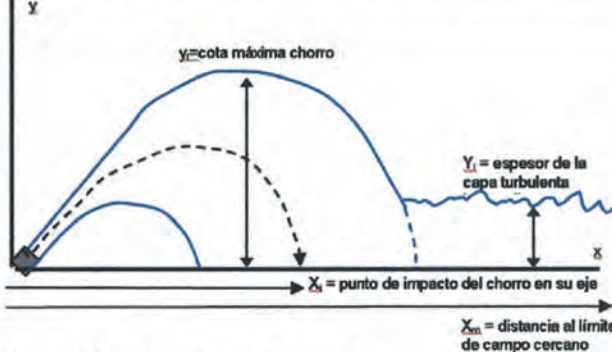
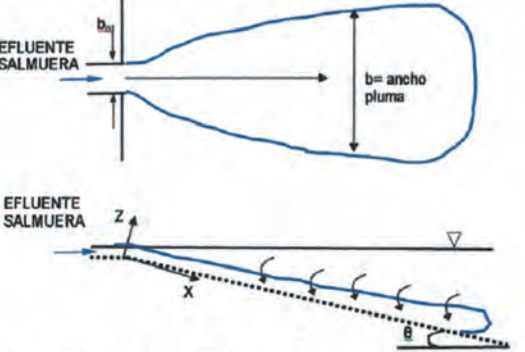
La simulación conjunta del campo cercano y lejano presenta importantes dificultades debido a la propia

naturaleza del fenómeno. La gran diferencia de escalas espaciales y temporales del comportamiento del efluente en una y otra región requiere el empleo de mallas y pasos de tiempo muy diferentes y no determinables a priori. Este hecho junto con otras dificultades aún no resueltas, justifican que la mayor parte de las herramientas disponibles simulen el campo cercano y el lejano de manera independiente.

Para la simulación del campo cercano, en el caso de vertido en chorro, destacan los modelos de tipo longitud-escala, donde las principales variables (geométricas y de dilución) del efluente de salmuera se calculan mediante fórmulas analítico-experimentales. Estas fórmulas derivan del análisis dimensional del fenómeno que, tras asumir ciertas hipótesis simplificativas, concluye en que las principales variables geométricas y de dilución del chorro dependen fundamentalmente del  $N^{\circ}$  adimensional de Froude. Las ventajas de esta metodología radican en la sencillez de aplicación y de interpretación, en los pocos datos de partida necesarios y en la fiabilidad de los resultados obtenidos (gracias al respaldo experimental de las fórmulas). Las desventajas derivan de que sólo permite el cálculo de determinadas variables (altura, alcance del chorro, etc.) en puntos concretos (de impacto, máxima altura, etc.) y no la simulación continua del fenómeno, y de que su fiabilidad depende, por una parte, del grado de identificación del caso real con el modelo físico del ensayo y, por otra, de la calidad de los ensayos que determinan los parámetros experimentales de las fórmulas. Además, suelen introducirse simplificaciones tan notables en el medio receptor que en muchas ocasiones dificulta la identificación con casos reales. Destacan las fórmulas propuestas por *Zeitoun (1970)*, *Roberts et al (1987, 1997)*, *Otranto (2006)*, módulos CORMIX1 y CORMIX 2 de CORMIX-GI, entre otras.

Los modelos de integración resuelven las ecuaciones hidrodinámicas integradas en la sección transversal del chorro o pluma, de modo que se obtiene como resultado el valor de las magnitudes en el eje del flujo. Para determinar su valor en los puntos de la sección transversal, se asume que varía según una determinada función de distribución, normalmente, gaussiana. Se considera que existe autosemejanza entre secciones. La integración de las ecuaciones convierte el sistema original de ecuaciones diferenciales de derivadas parciales (EDDP) en un sistema diferencial ordinario (EDO), lo que permite su resolución por métodos numéricos sencillos (Euler, Runge Kutta, etc.). Además, se realiza una simulación continua

Tabla 3. Formulaciones de modelización de la salmuera

| EJEMPLO DE FÓRMULAS DE MODELO DE LONGITUD ESCALA. (Tabla 3.1)   | EJEMPLO DE FÓRMULAS DE MODELO DE INTEGRACIÓN. (Tabla 3.2)  |
|---|--|
|  <p><i>Vertido de salmuera en chorro. Campo cercano. Esquema y formulación de Roberts (1997).</i></p> $\frac{y_i}{DF}, \frac{S_i}{F}, \frac{S_i}{F} = f(\alpha)$ $\frac{y_i}{DF}, \frac{S_i}{F}, \frac{S_i}{DF} = f(U_A, F, \alpha, \phi)$ |  <p><i>Pluma hipersalina. Campo lejano. Esquema y formulación de Alavian (1986).</i></p> $\frac{dy}{dx} = \frac{(2 - 0.5S_2R_i)E - S_1R_iS_p + C_d}{(1 - S_2R_i)}$ $\frac{dR_i}{dx} = \frac{3R_i(1 + 0.5S_2R_i)E - S_1R_iS_p + C_d}{y(1 - S_1R_i)}$ |
| EJEMPLO DE FÓRMULAS DE MODELO HIDRODINÁMICO. (Tabla 3.3)<br>(medio homogéneo, isotrópico, fluido incompresible, densidad constante exc. término de gravedad, descomposición de Reynolds para flujo turbulento, teoría de la viscosidad turbulenta de Boussinesq, ley de Fick, etc.).  |  |
| <p><i>Ecuación de Estado:</i></p> $\rho = f(T, S_a)$  | <p><i>Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento.</i></p> $\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \vec{f} + \nu \nabla^2 \vec{u}$  |
| <p><i>Ecuación de Continuidad.</i></p> $\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$  | <p><i>Ecuación de Transporte (conservación soluto)</i></p> $\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = -\left[ \frac{\partial \bar{u}_j' c'}{\partial x_j} \right] + k \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2}$   |

del fenómeno y se obtiene una descripción más detallada, con el valor de las variables en cualquier instante y punto del efluente. La principal desventaja es que, debido a las hipótesis asumidas para la integración, no es posible simular la existencia de fronteras ni de obstáculos en el modelo, por lo que el medio receptor tiene que asumirse como infinito, sin posibilidad de simular la interacción de efluente con los contornos. Debido a esto, la utilidad del modelo en campo cercano se limita a la zona previa al impacto del efluente con el fondo y siempre que éste no alcance la superficie, ni choque con ningún obstáculo. Entre estas formulaciones destacan las propuestas por Cipollina (2004), Jirka (1996), módulo CORJET de CORMIX-GI, etc. En campo lejano, con este tipo de modelo, no es posible simular el efecto de la batimetría,

la presencia de obstáculos, de canales submarinos, la interfaz entre capas, etc. En este caso encontramos las formulaciones de Alavian (1986, 1996), García (1996), etc.

Los modelos más completos para la simulación del fenómeno son los hidrodinámicos, que resuelven numéricamente las ecuaciones diferenciales originales en derivadas parciales (EDDP). Superadas las limitaciones informáticas, sería teóricamente posible realizar una simulación continua del fenómeno en campo cercano y lejano. Estos modelos asumen muchas menos hipótesis simplificadoras, consideran una gran cantidad de variables, tridimensionalidad, existencia de fronteras, etc. Aparte de la necesidad de un alto número de datos de partida (lo que supone una limitación a nivel práctico) y de la mayor dificultad de aplicación e interpretación



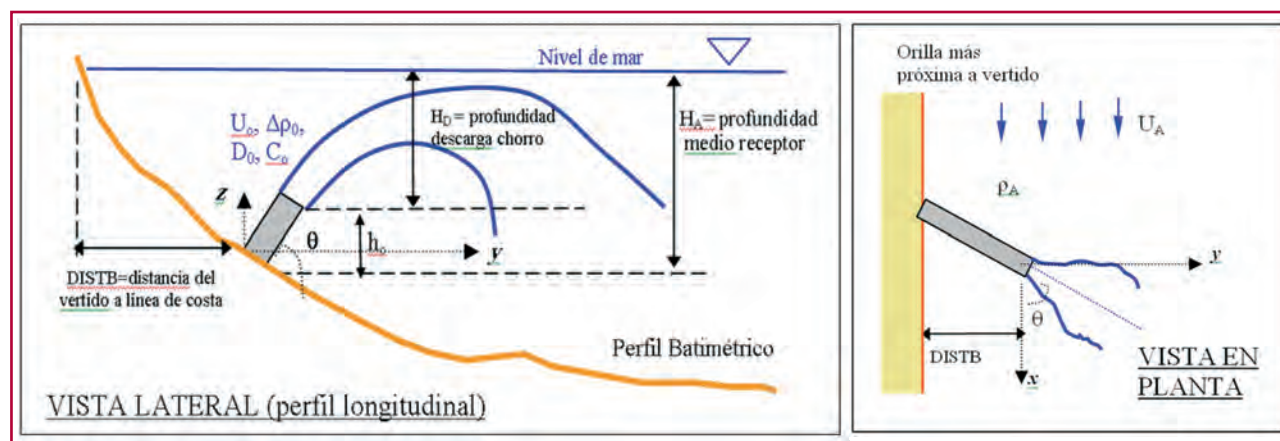


Fig. 2. Modelado del vertido con el método CORMIX1, vista lateral y en planta.

de los resultados, su principal inconveniente se debe al error de difusión numérica que se produce en la resolución de la EDDP en las zonas frontera, con importantes gradientes de magnitud (zona de contacto del chorro con fluido receptor, interfaz del flujo bicapa, etc.). En campo lejano, donde los valores de dilución son pequeños, estos errores, en la zona de interfaz (picnoclina) entre capas, son del orden de magnitud del fenómeno de difusión del fluido, lo que deriva en resultados no fiables, con tamaños de pluma y grado de dilución sobreestimados. Con celdas suficientemente pequeñas se reduciría el error numérico; sin embargo, la localización de las zonas frontera no es conocida a priori, y si se emplean estas celdas en todo el ámbito del modelo, resultaría inviable a nivel computacional.

La Tabla 3 presenta ejemplos de formulaciones de cada uno de los tipos de modelo descritos. Al final del artículo se definen las variables representadas.

## 7. Herramientas y software comerciales para la modelización del fenómeno y el diseño del sistema de vertido

A continuación se describen algunos de los modelos y software más empleados en la simulación del vertido al mar de la salmuera, que se caracteriza por flotabilidad negativa.

### 7.1. Campo cercano.

#### Descarga en chorro del efluente

La herramienta más empleada es el software comercial CORMIX-GI (*The Cornell mixing zone expert system*), adoptado por la USEPA (United States Environ-

mental Protection Agency) como modelo estándar de simulación de vertidos. Sus fórmulas han sido calibradas y validadas con datos experimentales, en su mayoría de laboratorio. Para la simulación de fluidos de flotabilidad negativa, cuenta con el módulo CORMIX1, (Donker, Jirka, 1990), aplicable a vertidos con chorro individual; el CORMIX2 (Akar, Jirka, 1991), para vertidos de chorros múltiples con tramo difusor. Ambos módulos se basan en fórmulas de tipo longitud-escala e incluyen numerosas categorías para clasificación del comportamiento del efluente según el valor relativo de los flujos de cantidad de movimiento y flotabilidad y de las condiciones del medio receptor (Jirka et al, 1996). El programa permite al usuario modificar los parámetros (diámetro, altura de la boquilla, velocidad de salida, ángulo vertical y horizontal, etc.), optimizando el diseño para maximizar la dilución. Incorpora, por tanto, una amplia variedad de geometrías de descarga, de condiciones ambientales, densidades relativas, interacciones con los bordes, intrusión aguas arriba, etc. (Jirka, Bleninger, 2004). Entre sus limitaciones se encuentran las propias de los modelos longitud-escala: la hipótesis de medio receptor asumido como canal rectangular de fondo plano, la imposibilidad de tratamiento estadístico de los datos, de simulación de oleaje, de corrientes multidireccionales, de vertidos simultáneos, etc. Sus autores estiman errores máximos potenciales (desviaciones típicas) de un +/-50% respecto a las mediciones reales (Donker, Jirka, 2001).

La figura 2 muestra los esquemas longitudinal y en planta de la modelización del vertido en chorro con el módulo CORMIX1 del software CORMIX-GI. Todas las variables representadas se definen al final del artículo.

Como ejemplo de aplicación del CORMIX, se tiene la modelización del vertido en el proyecto de "Planta



desaladora de Oropesa del Mar y obras complementarias, Castellón" (BOE, 2007). Se proyecta la descarga al mar de la salmuera mediante un emisario submarino con tramo difusor paralelo a la costa. Para la modelización de los chorros se ha empleado el módulo CORMIX1, considerando los chorros individualmente, lo cual es posible ya que los difusores se disponen de modo que no hay interacción entre chorros contiguos durante su trayectoria parabólica. Simulando varios escenarios, se opta, como diseño óptimo, por un tramo difusor con 20 elevadores de doble boquilla, a una altura de 1 m sobre el lecho marino, separación de 10 m entre sí y ángulo vertical respecto al fondo de  $45^\circ$ . La velocidad de salida del chorro es de unos 4 m/s. Para estas condiciones de vertido, con medio receptor en reposo, los resultados del CORMIX1 indican diluciones en torno a 16 a unos 8 m del punto de vertido.

Basado en fórmulas de integración, el CORMIX-GI incluye también el módulo CORJET (*The Cornell Buoyant Jet Integral Model*) para la simulación de un chorro individual (Figura 3). El modelo asume una distribución gaussiana para la variación de las magnitudes en la sección transversal, así como autosemejanza entre secciones (Jirka *et al*, 1996). Como resultados se obtiene una descripción tridimensional muy detallada de la geometría y concentraciones en el chorro, válida hasta la zona del impacto con el fondo.

## 7.2. Campo cercano y lejano.

### Vertido directo superficial

Para la modelización de este tipo de vertidos es frecuente emplear modelos hidrodinámicos tridimensionales, como el COHERENS (*A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas*), desarrollado en el Programa de Ciencias Marinas y Tecnologías para la Unión Europea; el MOHID (*Water modelling system*), desarrollado por MARETEC (*Marine and Environmental Technology Research Center*) de la Universidad Técnica de Lisboa y el Delft3D-FLOW de Delft Hydraulics. Estos modelos resuelven las ecuaciones diferenciales de continuidad y Navier Stokes mediante esquemas numéricos tipo ADI, con mallas de celdas rectangulares y esféricas, dimensiones de celda y pasos de tiempo variables y representación de la coordenada vertical mediante distintos métodos (capas de espesor constante, coordenadas sigma, etc.). Permiten tener en cuenta gran cantidad de variables: batimetría, corrientes multidireccionales, sinergias en-

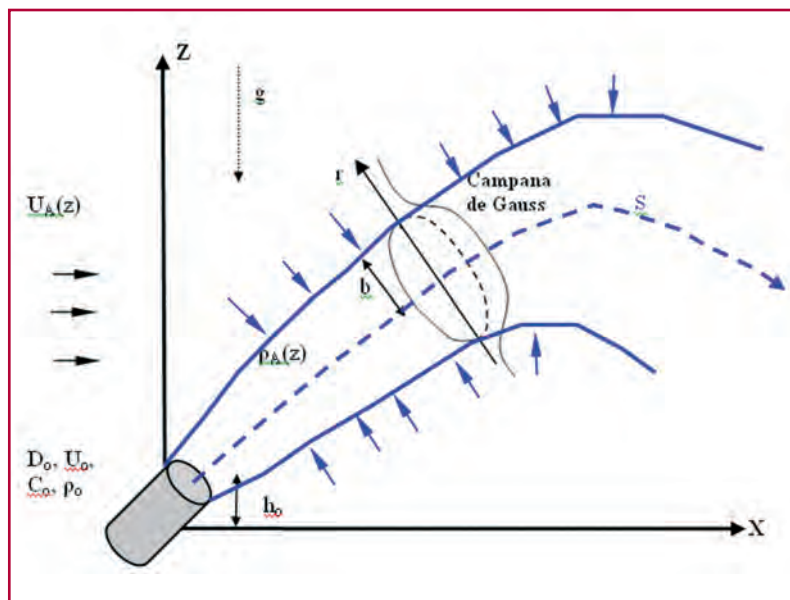


Fig. 3. Esquema de chorro simulado por CORJET.

tre vertidos, interacción con fronteras. Además, realizan un tratamiento estadístico de los datos. Los inconvenientes son los propios de los modelos hidrodinámicos, ya comentados en el apartado 6.

### 7.3 Campo lejano: pluma hipersalina

El software CORMIX-GI incluye el módulo FFLOCTR (*Far Field Plume Locator*), para la modelización de la corriente de gravedad propia del campo lejano. Tomando como datos de partida los resultados obtenidos de los módulos de campo cercano, aplica la metodología de vertido acumulativo, definiendo una línea de corriente alrededor de la cual se produce, por difusión, la expansión lateral y vertical de la pluma. El programa presenta importantes limitaciones en su aplicación, ya que comete errores significativos en la zona de transición de campo cercano a lejano y no tiene en cuenta la batimetría en el medio receptor (que asume como una canal rectangular), la presencia de oleaje, ni otras condiciones ambientales. El módulo, por el momento, no cuenta con el respaldo experimental de otros módulos como son el CORMIX 1 y 2.

La nueva versión del software CORMIX-GI (v.5.0) introduce importantes mejoras en la modelización de fluidos de flotabilidad negativa, principalmente en la simulación de vertido superficial, de la corriente de gravedad en campo lejano y de la continuidad entre las regiones de campo cercano y lejano.

## 8. Planes de vigilancia para protección del medio marino ante vertidos de salmuera

El significativo aumento del caudal de salmuera vertida al Mar Mediterráneo, el carácter estenohalino de algunas de sus especies de mayor valor ecológico (*Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa*, etc.), junto con el grado de incertidumbre asociado a los umbrales críticos de salinidad y a las herramientas de modelización empleadas, justifican la necesidad de establecer un plan de Control y vigilancia para garantizar la protección del medio marino frente al vertido de salmuera.

La Dirección General de Calidad y Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, con el asesoramiento del Centro de Estudios de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX), viene estableciendo en las Declaraciones de Impacto Ambiental, directrices y aspectos concretos y comunes a contemplar en los Planes de Vigilancia del medio marino en este tipo de proyectos. A continuación se resumen el planteamiento, objetivos y medidas más importantes contempladas, en el caso concreto de vertido de la salmuera en chorros mediante tramo difusor.

### a) Control de las variables de flujo

Se realizan mediciones, con frecuencia de tres horas, de los siguientes parámetros: caudal y salinidad del agua de alimentación, del agua de predilución, del efluente producto y de la salmuera. El objetivo es detectar posibles anomalías en el funcionamiento de la planta que pudieran afectar a las características de la pluma en la zona a proteger. Cabe también la posibilidad de incluir la medición de algunas de las sustancias químicas empleadas en el pretratamiento del agua bruta, que pudieran ser nocivas para el medio marino receptor.

### b) Control del efluente en la zona de vertido.

Durante las primeras semanas de funcionamiento de la planta y coincidiendo con días de calma, se determina el campo de salinidades alrededor de la zona de vertido. En concreto, se medirán: 1) salinidad en el punto de impacto del chorro con el fondo; 2) Límites longitudinales y transversales de la pluma hipersalina desde la zona de descarga hasta 100m siguiendo la línea de máxima pendiente; 3) Perfil de salinidades en la columna de agua en tres puntos situados a 100, 300 y 1000m de la zona de vertido siguiendo la línea de máxima pendiente, con el fin de localizar la interfaz

del flujo bicapa propio del campo lejano (que separa la capa superior de agua marina de la capa inferior de salmuera). Las medidas 1 y 3 se seguirán realizando una vez cada cuatro semanas.

El objetivo de la nube de puntos es caracterizar la geometría tridimensional y la salinidad del efluente en campo cercano y lejano, con datos que permitan comprobar la validez y calibrar los modelos

### c) Control de la calidad en el medio receptor

Se establecen puntos de control en los límites de la zona a proteger más cercanos al punto de vertido (siguiendo el gradiente batimétrico), donde, con frecuencia de 10 minutos, se toman medidas de salinidad a pocos centímetros del lecho marino, con el fin de captar la zona de la pluma hipersalina. En vista de los estrechos márgenes de salinidad permitidos para los hábitats a proteger, se exigen errores menores de 0.01psu en los aparatos de medición, que son sustituidos cada quince días. Los datos se recogen semanalmente y mediante un análisis estadístico se determinan los percentiles 25% y 5% ( $S_{25}$  y  $S_5$ ; salinidades superadas el 5% y el 25% de las observaciones), de modo que se puedan comparar estos valores con los límites críticos establecidos para las principales fanerógamas marinas. Una vez por semana y siempre que se detecten anomalías en el funcionamiento de la planta, se medirán también el pH, turbidez, oxígeno disuelto y nitratos.

En esta misma zona, y a una altura de 1m sobre el lecho marino, se colocan correntímetros para medir la velocidad y dirección de las corrientes del fondo, que afectarán al comportamiento de la pluma hipersalina.

Además se establecen uno o varios puntos "referencia" ajenos a la influencia del vertido, midiendo los mismos parámetros, de modo que permitan detectar si las anomalías se deben a la presencia de la salmuera.

### d) Control de la calidad y estado del ecosistema a proteger

Con frecuencia bianual se realiza un seguimiento del estado del hábitat a proteger, generalmente de las praderas de fanerógamas marinas, con medición de los parámetros característicos indicadores de su calidad.

- Todos estos controles se mantienen durante seis meses desde la puesta en marcha de la planta (que deben de incluir la época de mayor calma

en el medio receptor), tiempo que se considera suficiente para registrar las condiciones representativas de clima marítimo, así como las anomalías de funcionamiento de la planta. Transcurrido este tiempo y en función de los resultados obtenidos, el promotor podrá proponer modificaciones al Plan de Vigilancia Ambiental para mejora de su eficacia y ahorro de costes. En particular, si se ha detectado un método para establecer correlaciones entre las variables de flujo a la salida de la planta y los parámetros del medio receptor en la zona a proteger, considerando la situación de clima marítimo, se podrá reducir o eliminar el control en el medio receptor. En este caso, detectada una anomalía en las variables de flujo, sería posible predecir las consecuencias en la zona a proteger y aplicar las medidas oportunas para garantizar la protección.

- Como complemento al Plan de Vigilancia Ambiental, se establece protocolo de actuación para el caso en que las mediciones revelen un no cumplimiento de los umbrales de calidad establecidos en la zona a proteger. En primer lugar, se identifica y corrige la causa de la anomalía. Si esto no es posible, se modifican las condiciones de vertido para aumentar la dilución en campo cercano y, con ello, reducir la salinidad de la pluma en campo lejano. Caben, para esto, distintas opciones: predilución de la salmuera, reducción de la tasa de conversión, aumento de la velocidad de salida del chorro (por cierre de boquillas, disminución de la sección, etc.).

## 9. Recomendaciones, desde una perspectiva medioambiental, para el diseño de los sistemas de vertido de salmuera

Se presentan a continuación una serie de recomendaciones para la optimización de los elementos y parámetros del vertido del efluente de salmuera al mar, con el fin de minimizar el riesgo de afección al medio marino. Estas recomendaciones se basan en las investigaciones y publicaciones de varios autores, así como en la experiencia y conocimientos propios adquiridos en los últimos años, a partir de la evaluación ambiental de estudios y proyectos concretos, dentro del Plan Hidrológico Nacional, y bajo el marco de protección del medio marino.

### Recomendaciones respecto

#### a la localización del punto de vertido

- Situar la descarga lo más alejada posible de los fondos a proteger, principalmente de aquellos ocupados por las fanerógamas *Posidonia oceanica* o *Cymodocea nodosa*. El riesgo de afección prácticamente se anula si se realiza el vertido a mayor profundidad que éstas, dado que el efluente hiperdenso avanza por gravedad siguiendo los gradientes batimétricos.
- Situar el vertido en zonas de elevada hidrodinámica, ya que la presencia de oleaje y corrientes aumenta la turbulencia en el medio receptor y con ello la dilución del efluente.
- Si el vertido se realiza con emisario submarino interesa minimizar su longitud para reducir la afección por excavación del fondo marino para la zanja del emisario. El calado en la zona de descarga será suficiente para evitar que el chorro alcance la superficie del mar. Calados adicionales no incrementan la dilución.
- Algunos autores, como Höpner y Windelberg(1996), han elaborado una jerarquía de zonas para vertido de salmuera, según la sensibilidad de los hábitats marinos presentes. Concluyen que lo menos desfavorable (ambientalmente) es el vertido en costas oceánicas rocosas o arenosas de gran energía y presencia de corrientes longitudinales, como puede ser la zona de rompientes del oleaje.

### Recomendaciones sobre el sistema de vertido de la salmuera

- A pesar de sus ventajas técnicas y económicas, se desaconseja el vertido directo superficial en el caso de que existan fondos con especies estenohalinas (en distancias del orden de kilómetros), dado que la dilución en campo cercano es muy pequeña y la pluma puede propagarse largas distancias sin apenas dilución. Además, por el momento, no se cuenta con herramientas de modelización fiables para este tipo de vertidos.
- Cuando existe riesgo de afección a organismos bentónicos y se pretende maximizar la dilución en campo cercano, interesa realizar el vertido en chorro mediante emisario submarino. A este respecto es más eficaz el emisario de tramo difusor con varias boquillas de descarga que el de chorro único.



- En el diseño de un tramo difusor paralelo a la costa con chorros vertiendo a igual profundidad, interesa orificios de igual diámetro de modo que se optimice la dilución y aproveche al máximo la columna de agua disponible. Si el tramo difusor es perpendicular a la costa y cada chorro vierte a distinta profundidad, interesa disponer de boquillas con diámetros diferentes, menores a mayor profundidad, permitiendo una mayor velocidad de salida (mayor dilución) y aprovechándose completamente la columna de agua.
- El vertido de la salmuera sobre estructuras porosas no parece ser una solución eficiente en cuanto a dilución se refiere. Los ensayos realizados por el CEDEX (*Antequera y Jauregui, 2001*) indican diluciones bajas. En cualquier caso, y dado el elevado número de estas estructuras en nuestro litoral y que, en muchos casos, se encuentran en zonas ambientalmente degradadas y, por tanto, de menor riesgo de afección por presencia de salmuera, sería interesante profundizar en el estudio teórico y experimental de este tipo de vertido.
- El grado de dilución en campo cercano aumenta con la velocidad de salida del chorro (*Roberts, Sternau, 1997*). En los diseños más recientes se están dimensionando los chorros para velocidades de salida entre 3.5-5m/s, bajo el asesoramiento del CEPYC (CEDEX), y coincidiendo con otros autores (*Mauguin et al, 2005*).
- El ángulo de inclinación vertical de salida del chorro, óptimo en cuanto a dilución de la salmuera es 60° en el caso de medio receptor en reposo (*Zeltoun, 1970*) o con corrientes perpendiculares o de la misma dirección y sentido que el chorro. En el caso de corrientes de igual dirección y sentido opuesto a la de salida del chorro, se consiguen mayores diluciones vertiendo con chorros verticales, de 90° (*Roberts et al, 1997*).
- El orificio de descarga del efluente debe situarse a una cierta altura sobre el fondo, para evitar la reinstrusión del efluente hipersalino por la boquilla cuando se forma la capa turbulenta tras el punto de impacto del chorro con el fondo. En los proyectos actuales, con el asesoramiento del CEPYC, se proyectan a alturas entre 0,5 y 1,5m sobre el lecho marino.
- Para maximizar la dilución en campo cercano en el caso de emisario submarino con tramo difusor, la separación entre difusores ha de ser tal que no

se produzca la interacción entre chorros contiguos durante la trayectoria parabólica.

- Una opción que siempre puede resultar interesante es el vertido conjunto de la salmuera con las aguas de refrigeración, no contaminadas, procedentes de una central eléctrica. El efluente resultante de la mezcla, presenta menor salinidad que la salmuera y menor temperatura que las aguas de refrigeración, luego menor riesgo de afección sobre el medio.

#### **Recomendaciones sobre las herramientas y software de modelización a utilizar**

- Independientemente de la herramienta a utilizar, debe tenerse garantía sobre la calidad de los datos de partida a emplear, principalmente en lo relativo a la salinidad y densidad del efluente vertido y del fluido del medio receptor, al caudal y velocidad de descarga, a las corrientes ambientales y a la batimetría.
- Para la modelización del campo cercano de un vertido en chorro individual es adecuado el módulo CORMIX1 de CORMIX-GI, cuyas fórmulas cuenta con un importante respaldo experimental. Sus resultados son fiables hasta el punto de impacto del chorro con el fondo, dado que posteriormente no tiene en cuenta la interacción del chorro con la capa turbulenta (spreading layer) que se forma en el fondo. Para la modelización de un vertido con tramo difusor, se suele emplear el módulo CORMIX2 de CORMIX-GI. En el caso de interacción entre chorros contiguos, como el modelo asume la formación de una cortina de vertido tipo flujo lineal, considera el fenómeno como bidimensional, lo cual simplifica la resolución de las fórmulas. Sin embargo, según algunos autores (*Roberts y Tian, 2004*) debido a tales hipótesis el modelo CORMIX2 sobreestima la dilución en campo cercano hasta un 45%, así como la máxima altura alcanzada por el chorro y la longitud de campo cercano. Por tanto, dado que no modeliza el caso de tramo difusor sin interacción entre chorros (diseño precisamente óptimo en cuanto a dilución), se recomienda emplear, para estos casos, el modelo CORMIX1, tratando a los chorros individualmente.
- Para vertidos superficiales de salmuera no es correcto emplear el CORMIX3, de CORMIX-GI, dado que éste es solamente aplicable a fluidos de flotabilidad positiva. Existen fórmulas de tipo integración y longitud escala propuestas y desarrolladas por algunos autores:

(Hauenstein, 1984; Christodoulou, 2001; Bournet, 1999). También, con las limitaciones e inconvenientes ya comentados, pueden emplearse modelos hidrodinámicos comerciales como el COHERENS y el MOHID.

- Para la modelización del campo lejano se recomienda emplear modelos tridimensionales, como el ya comentado COHERENS o MOHID, teniendo en cuenta el riesgo de producirse errores numéricos y la posible sobreestimación del ancho, espesor y dilución de la pluma hipersalina, que serán menores cuanto menor sea el tamaño de celda en la zona de gradiente de magnitud. Es interesante comparar los resultados con los obtenidos de las fórmulas propuestas por autores como Alavian, 1986, 1996; García, 1996, etc.
- En caso de que el vertido se realice en una zona en el área de influencia de otros vertidos con posibles efectos sinérgicos, se propone (Jirka y Bleninger, 2004) la siguiente metodología: 1) Aplicar un modelo general de calidad de aguas (tipo COHERENS) con todas las fuentes de vertido existentes y obtener valores de salinidad de fondo. 2) Con este campo de concentraciones como datos de partida, aplicar un modelo de campo cercano, como, por ejemplo, el CORMIX, en el caso de vertido en chorro.

## 10. Síntesis y conclusiones

El Plan Hidrológico Nacional vigente propone la desalinización de agua de mar como una de las fuentes hídricas clave en el abastecimiento de las zonas costeras mediterráneas, para lo cual se pondrán en marcha un gran número de grandes plantas desalinizadoras, que supondrá incremento significativo del caudal de salmuera vertido al mar. La salmuera, con mayor salinidad y densidad que el agua marina, desciende al fondo y se propaga sobre el lecho, con alto riesgo de afección a los organismos bentónicos de carácter estenohalino, incluso a grandes distancias del punto de vertido. En el caso del Mar Mediterráneo son de especial importancia y fragilidad las fanerógamas marinas: *Posidonia oceánica* y, en menor grado, la *Cymodocea nodosa*, por lo que es imprescindible que el diseñador cuente con un conocimiento claro y amplio de los aspectos a considerar.

El presente artículo sintetiza y analiza las principales cuestiones a tener en cuenta para un diseño adecuado y eficaz del sistema de vertido al mar de la sal-

muera de las plantas desalinizadoras, con el fin último de garantizar la protección del medio marino. Estas cuestiones incluyen aspectos como: características y propiedades de la salmuera, límites críticos de salinidad para los hábitats y especies más relevantes; sistemas de vertido, comportamiento de la salmuera en medio marino, formulaciones matemáticas, herramientas de modelización, planes de vigilancia y criterios para la optimización del diseño. Se particulariza para el caso del Mar Mediterráneo, principal receptor de los vertidos procedentes de las plantas proyectadas en el Plan Hidrológico.

La importancia que la desalinización está adquiriendo y la creciente preocupación por mantener los valores ecológicos del medio marino, hacen necesario ampliar los estudios respecto al comportamiento de la salmuera en medio marino y sus posibles efectos sobre los ecosistemas. A continuación se proponen algunas líneas de investigaciones interesantes, en base a las lagunas de conocimiento detectadas:

- Efectos de la salmuera sobre el medio marino: Establecer umbrales críticos de salinidad para otras especies de interés en el Mar Mediterráneo: *Cymodocea nodosa*, *Zostera noltii*, etc.
- Sistemas de descarga empleados: Estudiar en mayor profundidad el vertido de la salmuera sobre estructuras porosas (sobre todo, dada la gran cantidad de diques y muros de escollera ocupando nuestro litoral; la descarga en zona de rompientes (interesante por la turbulencia y corrientes generadas); descarga superficial en ramblas, sobre playas, vertido conjunto con aguas de refrigeración, aguas residuales urbanas, etc. .
- Desarrollo y perfeccionamiento de herramientas de modelización: 1) Simulación continua de campo cercano y lejano para distintos sistemas de descarga; 2) Simulación región de campo lejano; 3) Simulación de las condiciones ambientales (batimetría, corrientes en el fondo, oleaje, etc.) de especial influencia en el comportamiento de la pluma en campo lejano; 4) Tratamiento estadístico de los datos; 5) Simulación de vertidos múltiples.
- Datos de partida: metodología para utilización de las bases de datos existentes en la actualidad, principalmente las relativas a clima marítimo y a batimetría. Tratamiento estadístico para determinación de los escenarios más probables y los más desfavorables. ♦

# Listado de símbolos

Tabla 3.1.

$D$  = Diámetro de la boca de descarga.  
 $F$  = Número de Froude densimétrico de chorro.  
 $\alpha$  = Ángulo de inclinación del chorro (ángulo vertical del eje con su proyección en planta).  
 $y_f$  = Altura medida en el límite superior del contorno del chorro, para el punto de máxima altura.  
 $S_f$  = Dilución medida en el eje del chorro, correspondiente al punto de máxima altura.  
 $x_i$  = Distancia horizontal desde el punto de vertido hasta el de impacto del chorro con el fondo.  
 $S_i$  = Dilución medida en el punto de impacto del chorro con el fondo.  
 $x_m$  = Distancia horizontal desde el punto de vertido hasta el final del campo cercano.  
 $S_m$  = Dilución conseguida al final de campo cercano (colapso de la turbulencia).  
 $y_l$  = Espesor del efuyente aguas abajo del punto de impacto, en la zona de "spreading layer".  
 $Y_A$  = Velocidad (constante) de la corriente ambiental en el medio receptor.  
 $\phi$  = Ángulo (en planta) entre la corriente ambiental y la trayectoria de vertido.  
 $\alpha$  = Ángulo (vertical) del chorro de descarga del efuyente con respecto a la horizontal.

Tabla 3.2.

$C_d$  = Coeficiente de fricción del efuyente con el fondo;  
 $E$  = Coeficiente de alimentación, incorporación de agua marina hacia efuyente hipersalino.

$S_1, S_2$  = Factores o coeficientes de forma, por promediación vertical de las ecuaciones.  
 $S_D = \tan \theta$  = Pendiente del fondo.  
 $R_i$  = Número de Richardson.

Tabla 3.3.

$\rho$  = Densidad del efuyente hipersalino. = Densidad inicial.  
 $T$  = Temperatura del efuyente hipersalino en un punto y en un instante.  
 $S_D$  = Salinidad del efuyente hipersalino en un punto y en un instante.  
 $u_i = (u_x, u_y, u_z)$  = Componentes instantáneas de la velocidad, según ejes coordenados  $x_i = (x, y, z)$ .  
 $p$  = Presión instantánea del efuyente.  $\vec{f}$  = Fuerzas de volumen; gravedad.  
 $\nu = \mu/\rho$ , la viscosidad dinámica del medio.  
 $c$  = Concentración instantánea de soluto, suma de componente aleatoria ( $c'$ ) y valor medio ( $C$ ).  
 $u$  = Velocidad media, promedio temporal.  
 $k$  = Coeficiente de difusión molecular

Figuras 2 y 3.

$U_o, C_o, \rho_o$  = velocidad de salida del chorro, concentración y densidad inicial del efuyente.  
 $\theta$  = Ángulo vertical del chorro respecto al fondo.  $h_D$  = altura del difusor sobre el lecho marino.  
 $\phi$  = Ángulo (en planta) entre la corriente ambiental y la trayectoria de vertido.  
 $b$  = Semiancho del chorro.  
 $U_A, \rho_A$  = Velocidad corriente y densidad del efuyente ambiental, del medio receptor.

## Referencias:

–ACUAMED (2007). Datos del estado del programa A.G.U.A. [www.mma.es](http://www.mma.es).  
–BOE: Boletín oficial del Estado (2007): "Resolución por la que se formula declaración de impacto ambiental positiva del proyecto de Desaladora de Oropesa del Mar y Obras Complementarias (Castellón)". BOE num.160, de 5 de julio de 2007.  
–Akar, P.J.; Jirka, G.H. (1991). "CORMIX2: An Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Multiport Diffuser Discharges", Technical Report EPA/600/3-91/073, U.S. EPA, Environmental Research Lab, Athens, Georgia, 1991.  
–Alavian, V. (1986). "Behaviour of density current on an incline", Journal of Hydraulic Engineering, vol 112, No 1.  
–Alavian, V.; Jirka, G.H.; Denton, R.A.; Johnson, M.C.; Stefan, G.C (Noviembre, 1992). "Density currents entering lakes and reservoirs". Journal of Hydraulic Engineering, vol 118, No 11.  
–Antequera, M.; Jáuregui, A. (2001): "Ensayos del comportamiento de vertidos salinos al mar". II Congreso Nacional de Desalación. Alicante. Asociación Española de Desalación y Reutilización Alicante (2001).  
–Autores varios, (2003): CEDEX, Aguas de la Cuenca del Segura. S.A., Universidades de Alicante y Murcia, Instituto Oceanográfico de Murcia, y Centro de Estudios Avanzados de Blanes-CSIC, 2001). "Estudio de los efectos de incrementos de salinidad sobre la faunística marina Posidonia oceanica y su ecosistema, con el fin de prever y minimizar los impactos que pudieran causar los vertidos de aguas de rechazo de plantas desaladoras". Documento de síntesis  
–Baltanás, A. (2005). "Programa A.G.U.A versus Tránsito del Ebro". Ingeniería y Territorio, nº 72.  
–Bournet, P.E.; Dartus, D.; Tassin, B.; Vinçon-Leite, B. (1999). "Numerical investigation of plunging density current". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 6, pp. 584-594.  
–Cerezo, L. (2006). "Pretratamiento de plantas desaladoras. La experiencia práctica de Veolia Water Solutions & Technologies Iberica". Curso "Plantas de desalación", Institute for International Research (IIR).  
–Christodoulou, G.C. (2001). "Lateral Growth of 3-D density Currents". Proceedings IAHR Congress, Beijing, China, pp. 29-34.

–Cipollina, A.; Bonfiglio, A.; Micale, G.; Brucato, A. (2004). "Dense jet modelling applied to the design of dense effluent diffusers". DESALINATION 167 (459-468), ELSEVIER.  
–Doneker, R.L.; Jirka, G.H. (1990). "Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Single Port Discharges (CORMIX1)", Technical Report EPA/600/3-90/012, U.S.EPA, Environmental Research Laboratory, Athens, Georgia, 1990.  
–Einav, R.; Lokiec, F. (2003). "Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon". DESALINATION 156, pp 79-85. ELSEVIER.  
–Fernández-Torquemada, Y.; Sánchez-Lisazo, J.L.; González-Correa, J.M. (2005). "Preliminary results of the monitoring of the brine discharge produced by the SWRO desalination plant of Alicante (SE Spain)". DESALINATION 182, pp 395-402. ELSEVIER.  
–Fernández-Torquemada, Y.; Sánchez-Lisazo, J.L.; (2006). "Effect of salinity on growth and survival of Cymodocea nodosa ascherson and Zostera noltii Hornermann". Biology Marine Mediterranean 13, pp 46-47.  
–García, E.; Ballesteros, E. (2001). "El impacto de las plantas desalinizadoras sobre el medio Marino: la salmuera en las Comunidades bentónicas Mediterráneas". Conferencia Internacional: "El Plan Hidrológico Nacional y la Gestión Sostenible del Agua. Aspectos medioambientales, reutilización y desalación". Zaragoza, Junio 2001.  
–García, Marcelo, (1996). "Environmental Hydrodynamics". Sante Fe, Argentina: Publications Center, Universidad Nacional del Litoral.  
–Hallworth, M.A.; Phillips, J.C.; Huppert, H.E.; Sparks, R.S.J. (1993). "Entrainment in turbulent gravity currents". NATURE, vol 362.  
–Hauenstein, W.; Dracos, TH. (1984). "Investigation of plunging currents lacustres generated by inflows". Journal of Hydraulic Research, vol 22.  
–Höpner, T.; Windelberg, J. (1996). "Elements of environmental impact studies on the coastal desalination plants". DESALINATION 108, pp 11-18. ELSEVIER.  
–Iso, S.; Suizu, S.; Maejima, A. (1994). "The Lethal Effect of Hypertonic Solutions and Avoidance of Marine Organisms in relation to discharged brine from a Desalination Plant". DESALINATION 97, pp389-399. ELSEVIER.  
–Jirka, D.C.; Gerhard H., Robert L. Doneker, Steven W. Hinton (1996). "MANUAL FOR CORMIX: A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters".

U.S.EPA, Office of Science and Technology, Washington.  
–Jirka, G.H.; Bleninger, T. (2004). "Design of multiport diffuser outfalls for coastal water quality protection". IAHR, XXI Congreso Latinoamericano de hidráulica São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.  
–Lloret, M.P.; Sánchez, J.L. (2001). "Bioensayo para la evaluación de los efectos producidos por un incremento de salinidad sobre la supervivencia del erizo de mar Paracentrotus lividus". II Congreso Nacional de Desalación. Alicante. Asociación Española de Desalación y Reutilización Alicante (2001).  
–Mauguin, G.; Corsin, P. (2005). "Concentrate and other waste disposals from SWRO plants: characterization and reduction of their environment impact". DESALINATION 182, pp. 155-364.  
–Otranto, F. (2006) "Laboratory Modelling of Seabrine discharges". The University of Western Australia.  
–Pérez Talavera, J.L.; Quesada Ruiz, J.J. (2001). "Identification of the mixing process in brine discharges carried out in Barranco del Toro beach, south of Gran Canaria (Canary Islands)". DESALINATION 139, pp. 277-286. ELSEVIER.  
–Roberts, P.J.W.; Toms, G. (1987). "Inclined dense jets in a flowing current". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 113, nº 3.  
–Roberts, P.J.W.; Fellow; Ferrier, A.; Daviero, G. (1997). "Mixing in inclined dense jets". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123, No 8.  
–Roberts, P.J.W.; Fellow; Sternau, R. (1997). "Mixing zone analysis for Coastal Wastewater Discharge". Journal of Environmental Engineering. Vol. 123, No. 12, December 1997, pp. 1244-1250.  
–Roberts, P.J.W.; Tian, X. (2004). "New experimental techniques for validation of marine discharges models". Environmental Modelling & Software 19.  
–Ruiz Mateo, A. (2007). "Los vertidos al mar de las plantas desaladoras". Revista AMBIENTA, n.51. pp. 51-57.  
–Terrados, J (1991). "Crecimiento y producción de las praderas de macrófitos del Mar Menor, Murcia". Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.  
–Torres, M. (2005). "Desalación y Planificación Hidrológica hoy". Revista Ingeniería y Territorio, n.72: Desalación, pp. 8-16.  
–Zeitoun, M.A et al. (1970). "Conceptual designs of outfall systems for desalination plants". Research and Development Progress Rept. No 550. Office of Saline Water, U.S. Dept. of Interior.